

植物纤维纸蜂窝的性能研究

余金光¹, 马兴运², 张旭锋¹, 李瑞敏², 益小苏²

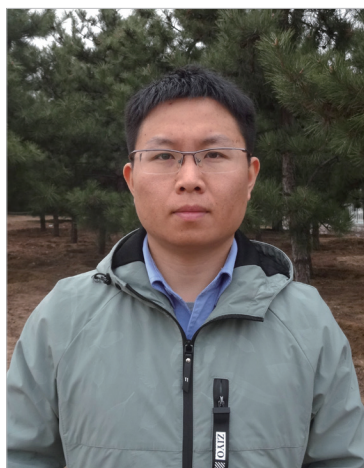
(1. 中航复材(北京)科技有限公司, 北京 101300;

2. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] 以植物纤维纸为原材料制备了正六边形纸蜂窝, 测试了其力学性能、阻燃性能以及吸水性能, 并用金相显微镜观察了蜂窝芯截面微观结构。结果表明植物纤维纸蜂窝芯的压缩强度和 L 向剪切强度低于间位芳纶纸蜂窝, 但满足Q/6S 1015-2005标准的指标; 植物纤维纸蜂窝平均烧焦长度35mm, $D_{m,240}$ 为16.2; 规格1.83-48的蜂窝芯吸湿率为5.5%, 吸湿后压缩强度保持率为87.6%; 植物蜂窝芯的树脂浸入到纸张内部, 导致蜂窝孔壁厚度比芳纶蜂窝薄, 节点处胶柱面积小。

关键词: 植物纤维纸蜂窝; 力学性能; 阻燃性能; 吸湿率; 微观形貌

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.080



余金光

硕士, 主要从事绿色复合材料、功能复合材料制备技术的研究, 参与工信部民用飞机专项、国家自然科学基金等科研项目。

蜂窝夹层结构主要由蒙皮、蜂窝芯材以及增强界面的胶膜构成, 由于蜂窝夹层结构具有高比强度、高比刚度、隔热等优异性能, 在航空航天领域得到广泛应用。目前主要的蜂窝芯材有铝蜂窝芯、芳纶纸蜂窝芯、玻璃钢蜂窝芯以及一些特种蜂窝芯, 如不锈钢蜂窝芯、碳纤维布蜂窝芯

等^[1-2]。其中芳纶纸蜂窝芯具有轻质、高强、高模、耐温、低介电等诸多优点, 在飞机内饰及次承力结构、轨道交通领域有重要应用^[3-4]。国外对芳纶纸蜂窝的研究较早且较深入, 建立了相关的数学模型^[5-6]。国内对芳纶纸蜂窝经过近30年的研究, 也取得了长足的发展, 制造工艺不断改进, 产品性能不断提高, 与国外制造商的生产水平已基本相当^[7-10]。

目前研究人员对芳纶纸蜂窝的研究主要还是集中在从宏观或者微观角度, 通过结构设计、控制生产工艺等提高蜂窝芯的力学性能^[11-14]。然而随着社会的发展, 人们的环保意识越来越强, 大家在选择材料时不仅仅关注材料的力学性能, 同时会考虑成本、环保等因素。芳纶纸由芳纶纤维和芳纶浆粕制成, 来源于石油等不可再生资源, 不可降解, 十分不利于环保, 而且成本高昂, 在轨道客车等民用领域推广困难。因此, 开发低成本、绿色环保的纸蜂窝芯成为蜂窝材料研究的一个新方向^[15]。

植物纤维来源于植物, 为可再生资源, 符合绿色发展的理念, 且成本

低廉。目前牛皮纸蜂窝在包装运输行业已有大量应用, 但由于牛皮纸蜂窝强度低, 在飞机内饰等对蜂窝力学性能有一定要求的方面还无法满足使用要求。本文以植物纤维纸为原材料, 通过浸渍酚醛树脂, 制备正六边形纸蜂窝, 并测试分析其力学性能、燃烧性能以及吸水性能, 并与同规格芳纶蜂窝性能进行对比, 为植物纤维纸蜂窝的制备和应用提供参考。

试验及方法

1 主要原材料

植物纤维纸, 自制, 厚度 $50\mu\text{m}$, 面密度 $40\text{g}/\text{m}^2$; 中温固化芯条胶, 黑龙江省科学院石油化学研究院生产; 酚醛树脂, 重庆三峡油漆股份有限公司生产; 磷氮类阻燃剂。

2 蜂窝芯制备

按传统的拉伸法制备植物纤维纸蜂窝, 即将植物纤维纸涂胶、叠合, 然后经过热压、拉伸定型、浸胶、固化等一系列过程制备得到。由于植物纤维纸本征不阻燃, 因此在蜂窝制备过程中需要进行阻燃处理。具体制备工艺流程如图1所示。

制备过程中使用的涂胶机、拉伸机、浸胶机均由中航复合材料有限责任公司提供。制备的植物纤维纸蜂窝芯规格为孔格边长 1.83mm, 密度 48kg/m³ (1.83-48)。

3 性能测试

非稳定型平面压缩强度测试: 按照标准 GB/T 1453-2005^[16] 进行试验, 试样尺寸为 60mm × 60mm × 12.7mm。试验设备为电子万能试验机, 由深圳三思纵横公司生产。试验机加载速率 0.5mm/min, 试验过程中连续加载直至蜂窝发生破坏, 试验结果取 5 个试样测试结果的平均值。

剪切强度及模量测试: 按照标准 GB/T 1455-2005^[17] 进行试验, 试验尺寸为 60mm × 150mm × 12.7mm。试验设备为电子万能试验机, 深圳三思纵横公司生产。将试样装在试验机上时应保证载荷作用线接近试样对角线, 试验机加载速率 0.5mm/min, 试验过程中均匀加载直至蜂窝发生破坏。试验结果取 5 个试样测试结果的平均值。

燃烧性能及烟密度测试: 按照标准 HB5469-2014 中垂直燃烧试验方法进行测试, 试样尺寸为 76mm × 368mm × 12.7mm, 观察并记录点火 90s 后每个试样的自熄时间、烧焦长度滴落物情况。试验结果取 5 个试样测试结果的平均值。按照 HB 6577-2014 标准测试植物纤维纸蜂窝燃烧烟密度, 测试仪器为 SDB 型 NBS 烟密度测试箱, 试样尺寸为 75mm × 75mm × 10mm, 试验结果取 3 个试样测试结果的平均值。

吸水性能测试: 按照标准 GB/T 14207-2008^[18] 进行试验, 试样尺寸为 60mm × 60mm × 12.7mm。试样在鼓风干燥箱中 105℃ 烘至恒重, 用分析天平称量试样初始质量 m_1 , 后将试样浸入蒸馏水中, 温度 (23 ± 0.5)℃, 浸泡 24h 后取出, 用滤纸吸干表面水分, 再浸入无水乙醇中 1min, 然后取出用滤纸吸干表面乙醇。用分析天

平称量试样吸水后质量 m_2 , 按照式 (1) 计算蜂窝芯吸水率。结果取 5 个试样测试结果的平均值。

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中, W 为植物纤维纸蜂窝芯吸水率, %; m_1 为蜂窝芯初始质量, g; m_2 为蜂窝芯吸水后质量, g。

金相显微镜分析: 用麦克奥迪 (Motic) 公司生产的 BA310Met 金相显微镜观察芳纶纸蜂窝和植物纤维纸蜂窝芯材断面形貌, 使用 Motic Images Advanced 3.2 图像分析软件测量蜂窝孔壁厚度及胶柱面积。

结果与讨论

1 植物纤维纸蜂窝芯力学性能

正六边形蜂窝芯如图 2 所示, W 向为蜂窝孔格展开的方向, L 向为垂直于蜂窝孔格展开的方向, 蜂窝芯的高度方向为 T 。

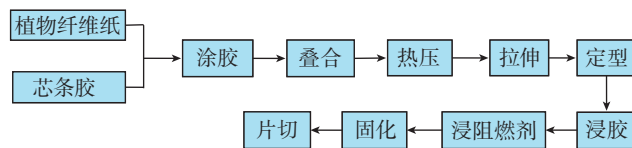


图1 植物纤维纸蜂窝芯制备流程

Fig.1 Preparation process of plant fiber honeycomb core

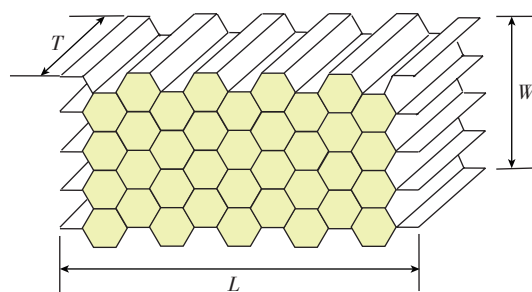


图2 正六边形纸蜂窝示意图

Fig.2 Hexagonal honeycomb core

表1 植物纤维纸蜂窝力学性能

规格	类别	平面压缩强度 /MPa	平面剪切强度 /MPa		平面剪切模量 /MPa	
			L 向	W 向	L 向	W 向
1.83-48	植物纸蜂窝	1.78	1.27	0.79	43.2	29.3
	间位芳纶蜂窝	1.89	1.42	0.75	52.3	28.6
	指标值	1.64	1.07	0.58	36	19

文中使用的是磷氮类阻燃剂。测试了植物纤维纸蜂窝芯 90s 垂直燃烧性能及烟密度,测试结果分别见表 2 和表 3。从结果可以看到,经过阻燃处理的植物纤维纸蜂窝芯的自熄时间为 0,无滴落物,同时燃烧长度在 35mm 左右,与芳纶蜂窝的阻燃性能基本相当。从烟密度测试结果看到,植物纤维纸蜂窝 240s 内的最大烟密度($D_{m,240s}$)平均值为 16.2。国内飞机内饰材料一般要求 240s 内的平均最大烟密度小于 20,因此植物纤维纸蜂窝的燃烧烟密度满足要求。

3 纸蜂窝截面微观形貌观察

树脂在纸张表面和内部的分布情况,对蜂窝的力学性能有较大影响^[11]。将孔格边长 1.83mm,密度 48kg/m³ 的芳纶蜂窝和植物纤维纸蜂窝制备成金相试样,用金相显微镜观察截面微观形貌,放大倍数均为 200 倍,结果见图 3。可以看到,芳纶蜂窝的金相照片中(图 3(a))有明显的白色发亮的框架,为芳纶纸骨架,表面附着了一层树脂,同时树脂富集在蜂窝节点处,形成近似三角形的胶柱。而植物纤维纸蜂窝的金相照片中(图 3(b)),植物纤维纸骨架与树

脂之间没有明显界限,同时在蜂窝节点处富集的树脂较少。

用分析软件计算了蜂窝节点处三角形胶柱的面积以及蜂窝孔壁厚度,结果见表 4。从结果可以看到,植物纤维纸蜂窝的孔壁厚度为 52 μ m,接近纸张本身厚度,远远小于芳纶蜂窝的孔壁厚度 66 μ m。这说明在植物纤维纸蜂窝中,树脂进入到纸张内部,而不是附着于纸张表面。这主要是由于植物纤维的多孔结构导致纸张表面疏松,树脂容易进入。同时植物纤维纸蜂窝节点处的胶柱截面面积较小,只有芳纶蜂窝的 1/6 左右。在一定条件下,蜂窝压缩强度与蜂窝孔壁厚度的平方成正比关系,植物纤维纸蜂窝的孔壁较薄,是导致植物纤维纸蜂窝压缩强度偏低的原因之一。

结论

(1) 以植物纤维纸为原材料制备了孔格边长 1.83mm、密度 48kg/m³ 的植物纤维纸蜂窝芯。

(2) 植物纤维纸蜂窝芯压缩强

度达到 1.78MPa, L 向和 W 向平面剪切强度分别为 1.27MPa 和 0.79MPa, L 向和 W 向平面剪切模量分别为 43.2MPa 和 29.3MPa。

(3) 规格 1.83-48 的植物纤维纸蜂窝芯 90s 垂直燃烧测试能够满足指标要求,烟雾密度测试满足飞机内饰指标要求。

(4) 规格 1.83-48 的植物纤维纸蜂窝吸湿率为 5.5%,吸湿后蜂窝芯的压缩强度下降,保持率为 87.6%。

(5) 植物纤维纸蜂窝中,树脂进入到纸张内部,而不是附着于纸张表面,导致植物纤维纸蜂窝孔壁厚度较薄,节点处胶柱面积小。

参考文献

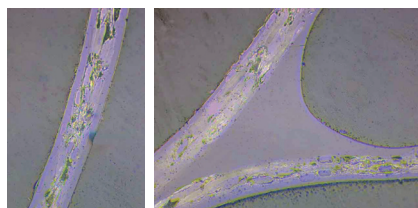
- [1] TOM B. Honeycomb technology[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [2] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] W O Dingzhu. Encyclopedia of composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [4] 穆举杰, 刘玉. 国产芳纶纸蜂窝在雷达罩上的应用[J]. 现代雷达, 2014, 36(9): 58-60.
- [5] MU Jujie, LIU Yu. Applications of domestic aramid paper honeycomb in radome[J]. Modern Radar, 2014, 36(9): 58-60.
- [6] 贾金荣, 汤海涛, 陈磊, 等. 芳纶制品在轨道交通领域的应用概况[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(S1): 62-65.
- [7] JIA Jinrong, TANG Haitao, CHEN Lei, et al. Application progress of aramid materials in rail transit[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(S1): 62-65.
- [8] MEO M, MORRIS A J, VIGNJEVIC R, et al. Numerical simulations of low-velocity impact on an aircraft sandwich panel[J]. Composite Structures, 2003, 62(3/4): 353-360.

表2 植物纤维纸蜂窝垂直燃烧性能

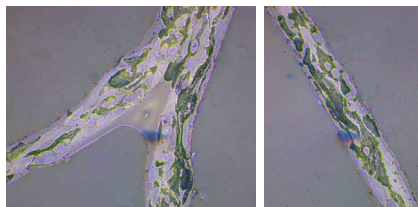
蜂窝规格	编号	自熄时间 /s	烧焦长度 /mm	滴落物
1.83-48	1	0	35	无
	2	0	32	无
	3	0	35	无
	4	0	31	无
	5	0	35	无
	平均值	0	34	无

表3 植物纤维纸蜂窝芯烟密度测试结果

蜂窝规格	编号	$D_{m,90s}$	$D_{m,240s}$
1.83-48	1	4.15	10.8
	2	11.1	20.8
	3	9.7	16.9
	平均值	8.32	16.2



(a) 芳纶蜂窝



(b) 植物纤维纸蜂窝

图3 树脂分布情况

Fig.3 Resin distribution

表4 胶柱截面面积和蜂窝孔壁厚度测试结果

蜂窝类型	规格	纸张理论厚度 / μ m	树脂含量 /%	胶柱截面面积 / μ m ²	孔壁厚度 / μ m
芳纶纸蜂窝	1.83-48	50	38	23167	66
植物纤维纸蜂窝	1.83-48	50	38	3751	52

- [6] MERAGHNI F, DESRUMAUX F, BENZEGGAGH M L. Mechanical behaviour of cellular core for structural sandwich panels[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 1999, 30(6): 767-779.
- [7] 王厚林, 王宜, 姚运振, 等. 芳纶纸结构性能及其对蜂窝力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(15): 2184-2187, 2192.
- WANG Houlin, WANG Yi, YAO Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper honeycomb[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15): 2184-2187, 2192.
- [8] 郝巍, 罗玉清. 国产间位芳纶纸蜂窝性能的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(6): 26-30.
- HAO Wei, LUO Yuqing. Study on the properties of china's meta-aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2009, 34(6): 26-30.
- [9] 郝巍, 罗玉清, 王萌. 国产间位芳纶纸蜂窝与NH-1蜂窝性能的对比研究[J]. 高科技纤维与应用, 2011, 36(4): 17-20.
- HAO Wei, LUO Yuqing, WANG Meng. A contrast study on domestic meta-aramid honeycomb and NH-1 honeycomb properties[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2011, 36(4): 17-20.
- [10] Hexcel Composites. HexWeb® A1 and A10 High strength aramid honeycomb product data[S/OL]. [2018-03-24]. http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/A1A10_eu.pdf.
- [11] 刘杰, 罗玉清, 纪双英, 等. 酚醛树脂分布对芳纶纸蜂窝力学性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(2): 26-30.
- LIU Jie, LUO Yuqing, JI Shuangying, et al. Effect of phenolic resin distribution on mechanical properties of nomex honeycomb[J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(2): 26-30.
- [12] 梁海州, 张元龙. 复合材料蜂窝夹层结构翼梁优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2009, 38(3): 3-5.
- LIANG Haizhou, ZHANG Yuanlong. Optimal design of composite wing beam with honeycomb sandwich[J]. Machine Building & Automation, 2009, 38(3): 3-5.
- [13] 马科峰, 刘杰, 王萌, 等. 三种间位芳纶纸蜂窝力学性能及断口形貌分析[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(2): 32-36.
- MA Kefeng, LIU Jie, WANG Meng, et al. Mechanical properties and fracture morphology analysis of three kinds of meta-aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(2): 32-36.
- [14] 杨进军, 马建忠, 刘文品. 大尺寸ACCCH芳纶纸蜂窝浸胶工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(14): 68-70.
- YANG Jinjun, MA Jianzhong, LIU Wenpin. Study on dipping process of large size ACCCH aramid paper honeycomb[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(14): 68-70.
- [15] 李瑞敏, 刘杰, 罗玉清, 等. 植物纤维纸蜂窝芯材的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(8): 55-59.
- LI Ruimin, LIU Jie, LUO Yuqing, et al. Preparation and properties of plant fiber honeycomb core[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8): 55-59.
- [16] 周祝林, 王亚熊, 张子龙. GB/T 1453-2005 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- ZHOU Zhulin, WANG Yaxiong, ZHANG Zilong. GB/T 1453-2005 Test method for flatwise compression properties of sandwich constructions or cores[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [17] 周祝林, 王亚熊, 王彬如, 等. GB/T 1455-2005 夹层结构或芯子剪切性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- ZHOU Zhulin, WANG Yaxiong, WANG Binru, et al. GB/T 1455-2005 Test method for shear properties of sandwich constructions or cores[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [18] 张汝光, 张小苹, 王中林. GB/T 14207-2008 夹层结构或芯子吸水性试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- ZHANG Ruguang, ZHANG Xiaoping, WANG Zhonglin. GB/T 14207-2008 Test method for water absorption of sandwich constructions or cores[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

通讯作者: 马兴运, 高级工程师, 研究方向为蜂窝市场营销, E-mail: maxingyun@163.com。

Study on Properties of Plant Fiber Honeycomb Core

YU Jinguang¹, MA Xingyun², ZHANG Xufeng¹, LI Ruimin², YI Xiaosu²

(1. ACC (Beijing) Science and Technology Co., Ltd., Beijing 101300, China;

2. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Hexagonal honeycomb were manufactured using plant fiber paper as raw material, and the mechanical properties, fire retardant and water absorption of plant fiber honeycomb were tested. The result shows that the compression property and *L* direction shear properties of the plant fiber honeycomb are lower than those of aramid paper honeycomb, which could fulfill the requirements of Q/6S 1015-2005; The average char length of plant fiber honeycomb is 35mm, the max smoke density in 240s is 16.2; the water absorption rates of 1.83-48 plant fiber honeycomb is 5.5%, and the retention rate of compression strength of honeycomb is 87.6%; the phenolic resin dipped into the interior of the plant paper, thus the honeycomb holes become thinner than aramid paper honeycomb, and the gum area becomes smaller, correspondingly.

Keywords: Plant fiber honeycomb core; Mechanical property; Fire retardant; Water absorption; Microstructure

(责编 铃兰)